

Modulare Simulationsumgebung zur Visualisierung und Analyse der Potenziale von industriellen Energieflexibilitäten

Stefan Roth, Jonas Rappold, Stefan Braunreuther, Gunther Reinhart

Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV,
Provinostr. 52, 86153 Augsburg, Telefon: +49 821 90678-168, Fax: +49 82190678-199,
E-Mail: stefan.roth@igcv.fraunhofer.de, <http://www.igcv.fraunhofer.de>

Kurzfassung: Die Energiewende erfordert die Einbeziehung verschiedener Stakeholder mit unterschiedlichen Interessen und Anforderungen. In der energieflexiblen Modellregion Augsburg werden Erfahrungen hinsichtlich des technischen Potenzials und der Umsetzbarkeit industrieller Flexibilitäten gewonnen. Der Austausch mit Partnern aus der Sozio- und Ökosphäre verdeutlicht zudem die Wechselwirkungen mit Gesellschaft und Umwelt. Die Ausgestaltung der Modelle und die Diskussion der Ergebnisse werden dabei durch eine modulare Simulationsumgebung unterstützt, die die Visualisierung und Analyse von Flexibilitätsmaßnahmen in unterschiedlichen Versorgungsszenarien ermöglicht.

Keywords: Modellregion, Nachfrageflexibilisierung, Flexibilitäten, flexible Industrieprozesse, Versorgungssituation, Industrie, Analyse, Visualisierung, Simulation, Lastgänge, Energiedaten, Stakeholder, Gesellschaft, Umwelt, Klimaziele, Szenarien

1 Problemstellung und Motivation

Mit dem Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung entschloss sich die Bundesregierung von Deutschland im Jahr 2010 die konventionellen Energieträger kontinuierlich durch erneuerbare Energien zu ersetzen. [1] Diesen energiepolitischen Zielen folgend, verlagert sich die zentrale Energieerzeugung durch konventionelle regelbare Kraftwerke zunehmend auf dezentrale regenerative Erzeugungsanlagen, wie Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen. Deren Einspeiseleistung lässt sich nicht an die Belastungskurve der elektrischen Energieverbraucher anpassen, da sie den gegebenen Witterungsverhältnissen folgt. Dadurch wird es für eine zuverlässige Energieversorgung zukünftig immer wichtiger, die elektrische Last an die Erzeugung aus fluktuierenden Energiequellen anzupassen, statt wie bisher die Erzeugungsleistung an der Nachfrage zu orientieren.

Insbesondere im Bereich der industriellen Produktion können große Potenziale für Lastverschiebungen zur Unterstützung der Netzstabilität erschlossen werden. Bisher werden diese Maßnahmen in erster Linie in energieintensiven Industriezweigen eingesetzt. Weiten Teilen der produzierenden Unternehmen sind die Potenziale bei der Erschließung und Vermarktung von Flexibilitäten kaum bekannt, oder sie stehen vor unterschiedlichen Herausforderungen, die den Zugang durch technische oder wirtschaftliche Hürden erschweren. [2]

Im Rahmen des Energiewendeprojekts „SynErgie“ werden in der Modellregion „Wirtschaftsraum Augsburg“ regionale Flexibilitätsansätze für einen nachhaltigen Energieverbrauch gestaltet sowie gemeinsam mit den Interessengruppen aus der Techno-, Öko- und Soziosphäre bewertet und weiterentwickelt. Das Ziel der Arbeiten ist die Ableitung potenzieller Geschäftsmodelle und die Schaffung von Akzeptanz für die energiewendegetriebenen Entwicklungen in der Region und darüber hinaus. Dazu werden neben technischen Aspekten auch die Auswirkungen auf die Zivilgesellschaft und Wechselwirkungen mit der Umwelt betrachtet. In Abbildung 1-1 ist eine Übersicht der Modellregion mit wesentlichen Daten zu Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur gegeben. Im Jahr 2016 wurden rund 28 Prozent des Stromverbrauchs durch erneuerbare Energieträger zur Verfügung gestellt, insbesondere durch Photovoltaikanlagen, Laufwasserkraftwerke und Biomasseheizkraftwerke. In den Jahren 2015 und 2016 wurden 14 Windkraftanlagen mit einer Leistung von jeweils rund 2,4 MW in der Modellregion in Betrieb genommen.¹ [3]

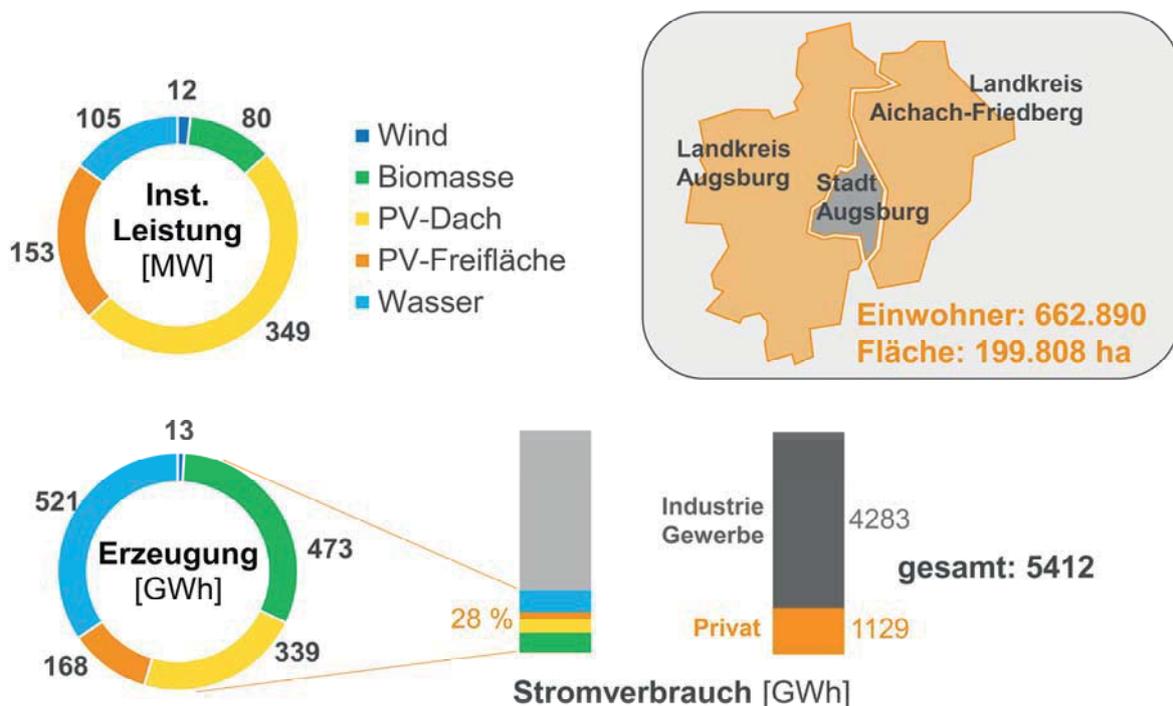


Abbildung 1-1: Erzeugungs- und Verbrauchsdaten der Modellregion „Wirtschaftsraum Augsburg“

Die energieflexible Modellregion kann im nationalen und regionalen Kontext betrachtet werden (Abbildung 1-2). Durch die Reaktion auf die bundesweite Einspeisesituation der erneuerbaren Energien wird die Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch unterstützt und so ein zeitlicher Versatz von Erzeugungsleistung und Verbrauch ausgeglichen. In zukünftigen Versorgungsszenarien mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien muss die verbleibende Residuallast durch steuerbare Kraftwerke gedeckt werden. Diese verbleibende Must-run-Kapazität, die weiterhin fossile Brennstoffe wie Kohle oder Erdgas als Primärenergieträger benötigt, kann somit durch Flexibilitätspotenziale in der Modellregion reduziert werden. Wird durch geeignete regionale Energiemärkte die verfügbare Erzeugungsleistung vor Ort als Zielgröße berücksichtigt, so kann – mittels Einsatz von Flexibilitätsmaßnahmen – der

¹ Einige Windkraftanlagen, die 2016 in Betrieb genommenen wurden, konnten in Abbildung 1-1 nicht berücksichtigt werden, da die Daten zur Stromerzeugung noch nicht vorlagen.

Energietransport von erzeugungsstarken Regionen in die verbrauchsstarke Modellregion verringert werden. Diese Korrektur des räumlichen Versatzes von Erzeugung und Verbrauch, kann den Netzausbaubedarf verringern.

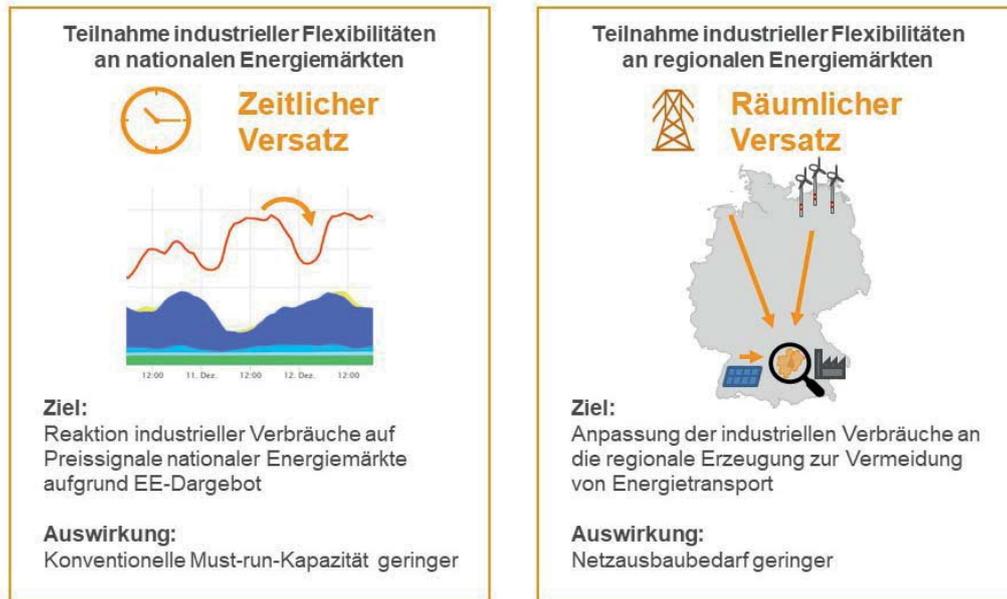


Abbildung 1-2: Die Modellregion im nationalen und regionalen Kontext

2 Methodische Vorgehensweise

Damit die Konzepte und Modelle zur Nutzung von industriellen Flexibilitäten die Versorgungssicherheit bei zunehmend volatiler Einspeisung effektiv unterstützten und dabei ökologische und sozioökonomische Auswirkungen richtig eingeordnet und eingeschätzt werden, ist ein fachlich fundierter Dialog zwischen sehr unterschiedlichen Stakeholdern unabdingbar. Die entwickelte modulare Simulationsumgebung stellt ein umfassendes Werkzeug zur Visualisierung, Analyse und Demonstration von Versorgungssituationen für Stakeholder aus unterschiedlichen Branchen und Fachrichtungen in frei wählbaren Modellregionen dar. Aufbauend auf einer umfassenden Analyse von relevanten Stakeholdern aus der Techno-, Sozio-, und Ökosphäre von exemplarischen regionalen Modellregionen [4], können für die Simulationsumgebung spezifische Anwender (Abbildung 2-1) abgeleitet werden, die sich abhängig von ihrer fachlichen Fokussierung und ihrem vorrangigem Tätigkeitsfeld kategorisieren lassen und damit verschiedenen Anwendungsfällen der Umgebung zuordnen lassen. Hierbei werden zwei Anwenderfälle unterschieden:

- **Anwendung in der Technosphäre (Analyse):** Wird durchgeführt von Stakeholdern, die über einen energie- oder produktionstechnischen Hintergrund verfügen und die die Simulationsumgebung somit zur Visualisierung und Analyse von Flexibilitäten und deren Auswirkungen auf die Versorgungssituation in einer Modellregion verwenden. Beispiele sind Netzbetreiber, Industrievertreter oder Aggregatoren von Flexibilitäten.
- **Anwendung in der Sozio- und Ökosphäre (Demonstration):** Die Kategorie der Stakeholder mit technischem Hintergrund bereitet Anwendungsfälle auf, die dann branchenfremden Stakeholdern demonstriert werden können um eine Basis für den interdisziplinären Diskurs zu schaffen, der eine objektive Bewertung und Weiterentwicklung von Flexibilitätsmaßnahmen und deren Umfeld ermöglicht.

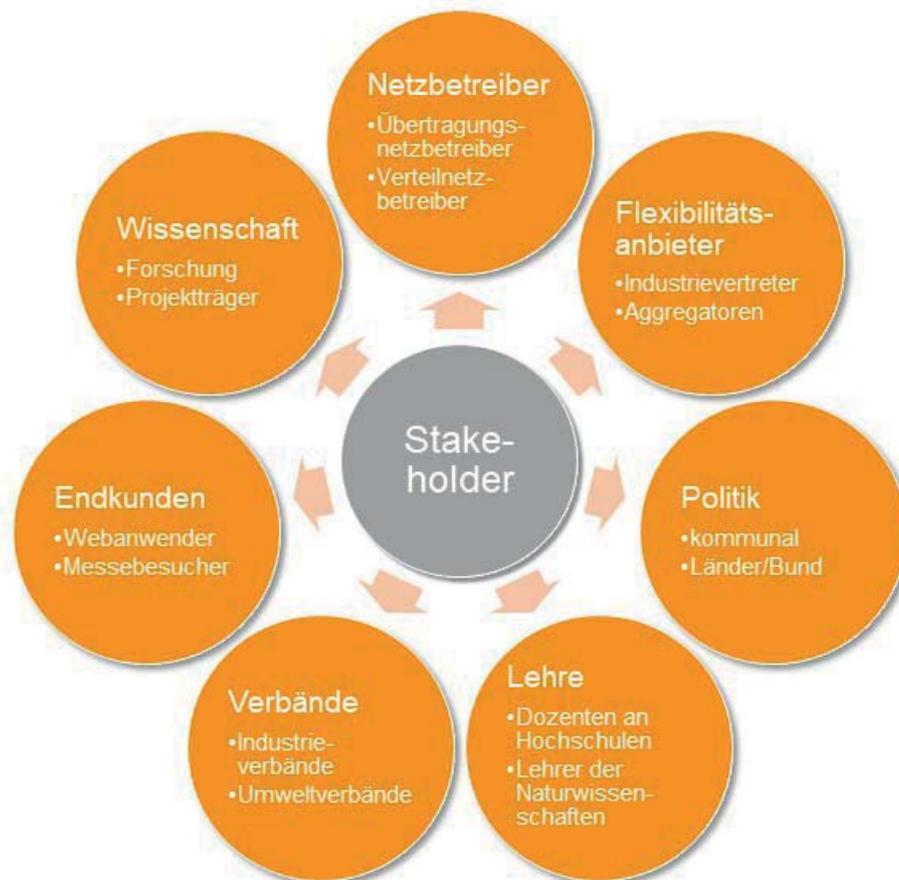


Abbildung 2-1: Relevante Stakeholder aus der Techno-, Sozio- und Ökosphäre

Neben zwei Kategorien von Anwenderfällen werden zudem zwei Anwendungsfälle unterschieden (Abbildung 2-2). Diese beziehen sich auf die wesentlichen Systemdienstleistungen, die von Flexibilitäten für den Netzbetrieb erbracht werden können [5]:

- **Netzdienliche Flexibilität (Ereignis)** in ausgewählten Engpasssituationen, wie lokalen Spannungsproblemen oder Betriebsmittelüberlastungen. Der Betrachtungszeitraum bezieht sich auf einen stark eingeschränkten Bereich (Tag, Woche, Monat) in dem die Energieparameter und Flexibilitätseinsätze detailliert dargestellt werden.
- **Systemdienliche Flexibilität (Bilanz)**, wie sie heute vom Übertragungsnetzbetreiber für den Erhalt der Systemstabilität genutzt wird und zukünftig möglicherweise in kleineren, dezentralen Bilanzierungsgebieten auch von Verteilnetzbetreibern. Der Betrachtungszeitraum ist hierbei größer (Monat, Jahr) und es werden Flexibilitäten unterschiedlicher Art gehäuft abgerufen um die Auswirkungen auf die Residuallast zu ermitteln.

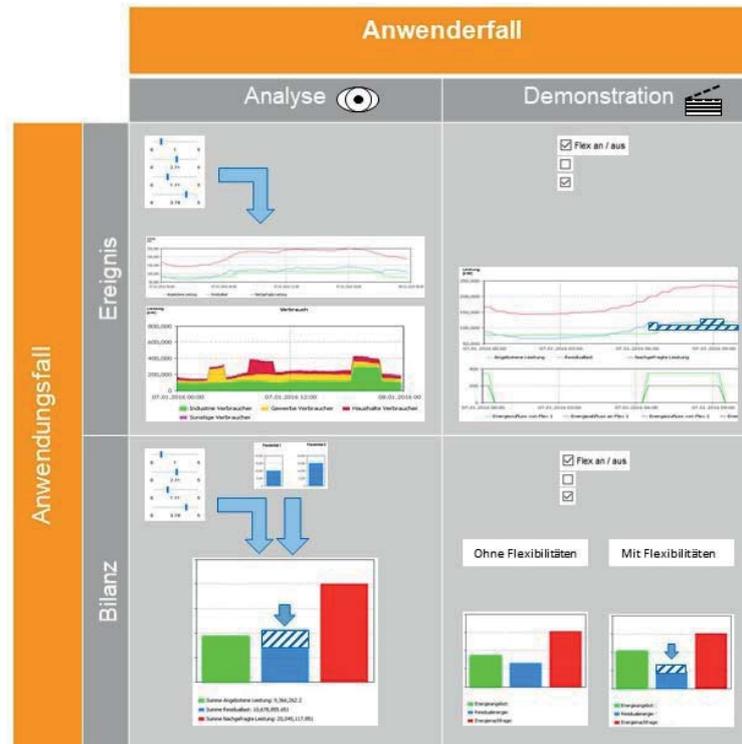


Abbildung 2-2: Gegenüberstellung von Anwender- und Anwendungsfällen

3 Konzept und Aufbau der Simulationsumgebung

Das Konzept und der Aufbau der Simulationsumgebung zur Potentialanalyse flexibler Industrieprozesse in der Modellregion Augsburg orientieren sich an Abbildung 3-1.

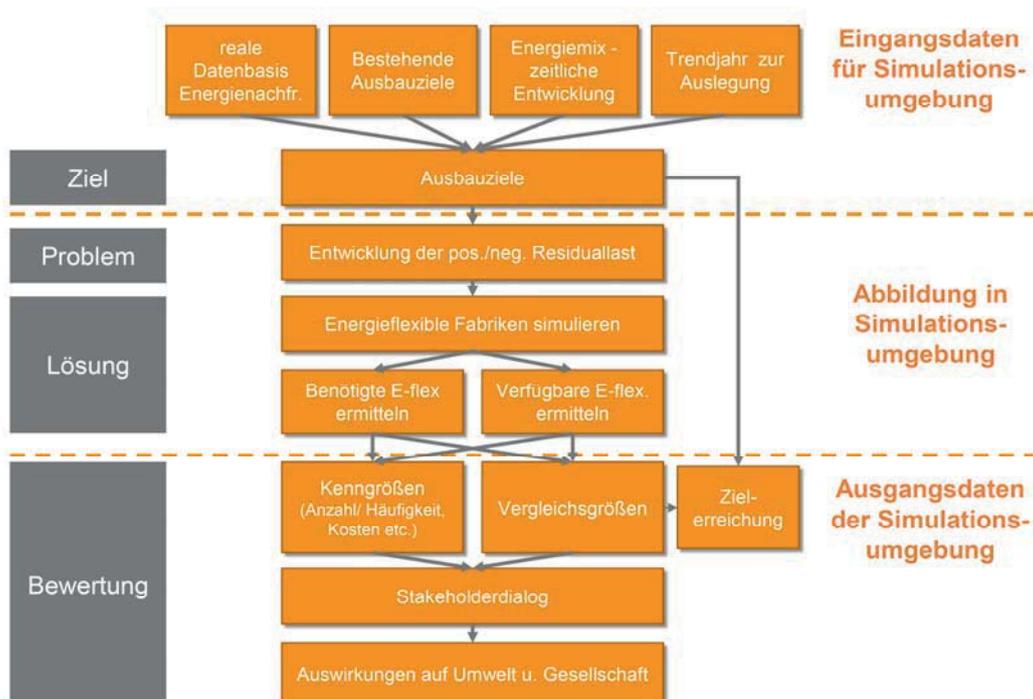


Abbildung 3-1: Konzept und modularer Aufbau der Simulationsumgebung

Parallel zu Erzeugungs- und Verbrauchsdaten der betrachteten Region bilden bestehende Ausbauziele sowie die Entwicklung des regionalen Energiemixes die Eingangsdaten des Modells. Mittels einer hinterlegten Logik wird der netzdienliche Einsatz unterschiedlicher Flexibilitäten, unter Beachtung gegebener Restriktionen, gesteuert und die erreichten Werte simultan in Graphen, Zustandsdiagrammen und Bilanzen anschaulich visualisiert. Eine Erweiterung des Modells um Einflussfaktoren wie Wetter oder monetäre Größen ist in Anbracht der Verwendung des modular aufgebauten Simulationswerkzeugs AnyLogic realisierbar. Die Bewertung der Daten erfolgt anhand von Vergleichs- und Kenngrößen und dient als Input für Stakeholderdialoge. Ebenso werden die Auswirkungen auf sozio- und ökologische Fragenstellungen basierend auf dem Einsatz flexibler Industrieprozesse diskutiert.

3.1 Verwendete Softwarelösung

Zur Analyse der Auswirkungen des Einsatzes verschiedener industrieller Flexibilitätsarten hinsichtlich Netzentlastung wird ein stochastisches und hybrides Simulationsmodell, basierend auf der Software AnyLogic eingesetzt. Dieses erlaubt neben der Simulation diskreter Ereignisse – wie Flexibilitätseinsätze, Wetter oder Steuerungsalgorithmen – auch die Abbildung von Energie- und Kostenflüssen mittels System Dynamic Modellen. So ist die Evaluierung flexibilisierbarer Prozessen bezüglich monetärer sowie energetischer Auswirkungen auf vergangene und prognostizierte Zeiträume möglich. Eine Manipulation der eingebundenen Einspeise- und Lastprofile erlaubt zudem die individuelle Betrachtung von Leistungsflüssen. Die modulare, objektorientierte Struktur gestattet darüber hinaus eine flexible Erweiterung und Detaillierung des existierenden Modells.

3.2 Eingabe- und Ausgabeparameter der Modellregion

Primär veranschaulicht das Simulationsmodell die Erzeugungs- und Verbrauchsdaten der Modellregion. Dazu werden die jeweiligen Lastgänge des Betrachtungszeitraums als Viertelstundenwerte in einem Excel-Dokument abgebildet und in das Modell eingebunden. Abbildung 3-2 zeigt die Unterteilung der Erzeugungsdaten in erneuerbare Energien wie Wind, PV, Biomasse, Wasser und Sonstige sowie konventionelle Kraftwerke. Die Verbrauchsdaten sind hinsichtlich Industrie, Gewerbe, Haushalte und Verkehr / Wärme unterschieden. Zur Abbildung diverser Szenarien ist eine Variation der Lastgänge mittels Skalierungsfaktoren realisiert. Um die Entwicklung der Elektromobilität zeitnah im Modell mit abzubilden ist die Einbindung weiterer Lastgänge gegeben.



Abbildung 3-2: Unterteilung der Erzeugungs- und Verbrauchsdaten im Simulationsmodell

Die Ausgabe und Visualisierung der Daten erfolgt stakeholderbezogen in verschiedenen Fenstern und ermöglicht somit sowohl eine detaillierte Analyse der Situation sowie eine

Veranschaulichung der Flexibilitätseinsätze und deren Auswirkungen. Neben der Visualisierung der gesamten Erzeugungs- und Verbrauchsleistung sowie der Residuallast, ist eine detaillierte Anzeige der jeweiligen Kategorien gegeben. Ferner ist der Einsatz der Flexibilitäten dargestellt, wobei zeitgleich die Auswirkungen auf Erzeugung und Verbrauch veranschaulicht werden. Für ein verbessertes Verständnis der Flexibilitäten sind die entsprechenden Zustände der Industrieprozesse in Zustandsdiagrammen demonstriert. Im Fenster Bilanz ist eine energetische Übersicht zu Erzeugung und Verbrauch in der Region mit und ohne den simulierten Flexibilitätseinsätzen gegeben. Ferner erfolgt die Darstellung monetärer Aspekte bezogen auf den Einsatz von Flexibilitäten.

3.3 Eingabemaske für Energieflexibilitäten

Die Eingabe verschiedener Flexibilitäten erfolgt zu Beginn der Simulationsvorgänge. Exemplarisch sind verschiedene energieintensive Prozesse mit großen Flexibilitätspotentialen hinterlegt. Weitere Flexibilitäten können individuell gestaltet und mittels einer Eingabemaske eingepflegt werden. Die Eingabe orientiert sich dabei an den von Grassl [6] definierten Flexibilitätsarten. Folgende industrielle Flexibilitätsarten sind dabei dem Energiemodell zu Grunde gelegt:

- Prozess unterbrechen (kurz- / mittelfristig)
- Prozessparameter anpassen
- Produktionsreihenfolge ändern
- Schichtzeiten anpassen
- Auftragsstart verschieben
- Pausenzeiten verschieben
- Maschinenbelegung anpassen
- Energie (zwischen-)speichern (kurz- / mittelfristig)
- Energiequelle wechseln

Die Lastgänge der eingegebenen Flexibilitäten werden als Viertelstundenwerte in eine Excel-Datei überführt und stehen so über die Simulation hinaus für weitere Bearbeitungen zur Verfügung. Simultan dazu erfolgt für jede Flexibilität die Erstellung eines Zustandsdiagrammes um über den Einsatzzeitraum hinaus auch den Betriebszustand des jeweiligen Prozesses zu veranschaulichen. Abbildung 3-3 zeigt ein solches Diagramm für die Abschaltung bzw. den Start einer Anlage aus bzw. in den Normalbetrieb.

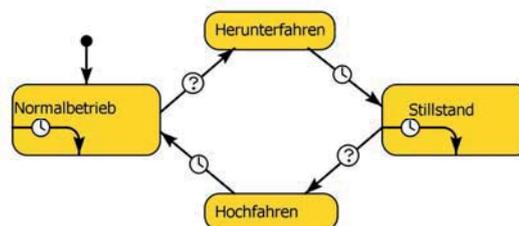


Abbildung 3-3: Zustandsdiagramm eines industriellen Prozesses

3.4 Logik des Flexibilitätseinsatzes

Die hinterlegte Logik des Modells analysiert zu Beginn der Simulation in einem separaten Modul die Lastgänge der Modellregion und ermittelt daraus den Bedarf an Flexibilitäten für einen festgelegten Zeitraum. Dabei wird der Residuallastverlauf nach positiven und negativen

Ausprägungen abgesucht und untersucht, ob diese mittels Einsatz passender Flexibilitäten zu reduzieren sind. Die Optimierung erfolgt in Hinsicht auf größtmöglichen Nutzen zur Glättung der Leistungsspitzen bzw. -täler im Residuallastverlauf oder zur Reduzierung der Residuallast. Zeitraum und Repetition der Optimierung sind zu Beginn der Simulation festzulegen. Abbildung 3-4 zeigt schematisch die Funktionsweise des Algorithmus. In verbrauchsstarken Zeiten sind Lasten abzuschalten. Dazu werden bereits verschobene Flexibilitäten genutzt bzw. neue Flexibilitäten eingesetzt, wobei diese unter Umständen zügig nachzuholen sind. Ebenso sind in erzeugungsstarken Zeiten Lasten zuzuschalten um Energieüberschüsse zeitnah zu verbrauchen.

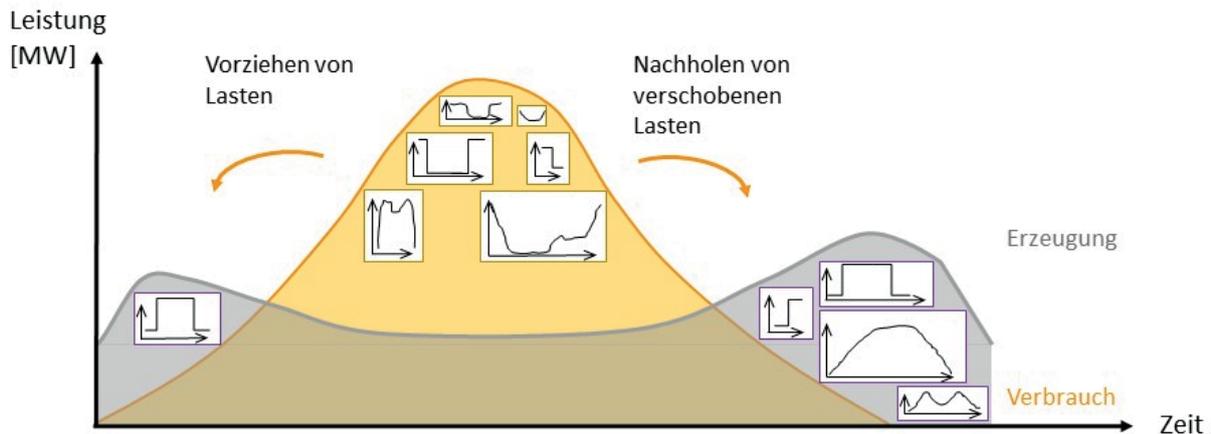


Abbildung 3-4: Einsatz verschiedener Flexibilitäten zur Reduzierung von Leistungsspitzen im Verbrauch sowie Nutzung von Energieüberschüssen in erzeugungsstarken Zeiten

Um die Flexibilitäten optimal einzusetzen ermittelt der Algorithmus die Größe der Überhöhungen im Residuallastverlauf. Die Flexibilitätslastgänge, welche vereinfacht als Blöcke zu betrachten sind, werden anschließend hinsichtlich bestmöglichem Nutzen für den betrachteten Optimierungszeitraum auf die Überhöhungen verteilt. Da eine Flexibilitätsoption in der Regel nur für begrenzte Zeit zur Verfügung steht, bzw. erst nach einiger Zeit wieder verwendbar ist, kommt es zu Unterbrechungen. Diese werden vom Algorithmus berücksichtigt und die Flexibilitätsblöcke entsprechend positioniert.

4 Exemplarische Anwendung der Simulationsumgebung

Zu Beginn der Simulation sind je nach betrachtetem Szenario die Erzeugungs- und Verbrauchslastgänge der Modellregion einzubinden. Neben aktuellen Daten können auch künftig zu erwartende Lastgänge eingebracht werden. Um die von der Bundesregierung geforderten Klimaziele bis 2050 zu erreichen, kann dem Modell beispielsweise das Klimaschutzenszenario 95 (KS 95) zugrunde gelegt werden, welches eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 fordert. Somit ist die Evaluierung realistischer Zukunftsszenarien für die kommenden Jahrzehnte möglich.

Um den Einsatz flexibler Prozesse in der Simulationsumgebung zu betrachten, besteht die Option auf hinterlegte Flexibilitäten zurückzugreifen oder neue Flexibilitätsmaßnahmen individuell einzugeben. Abbildung 4-1 veranschaulicht die Modellierung unterschiedlicher industrieller Prozesse (unten) und Energiespeicher (oben) anhand von Zustandsdiagrammen. Einsatzzeitraum und -häufigkeit der Flexibilitätseinsätze sind als Input zu definieren. Während der Simulation führt der hinterlegte Algorithmus eine Einsatzoptimierung der verfügbaren

Flexibilitäten unter Beachtung der definierten Restriktionen sowie dem Ziel der Residuallastminimierung bzw. Spitzenglättung durch.

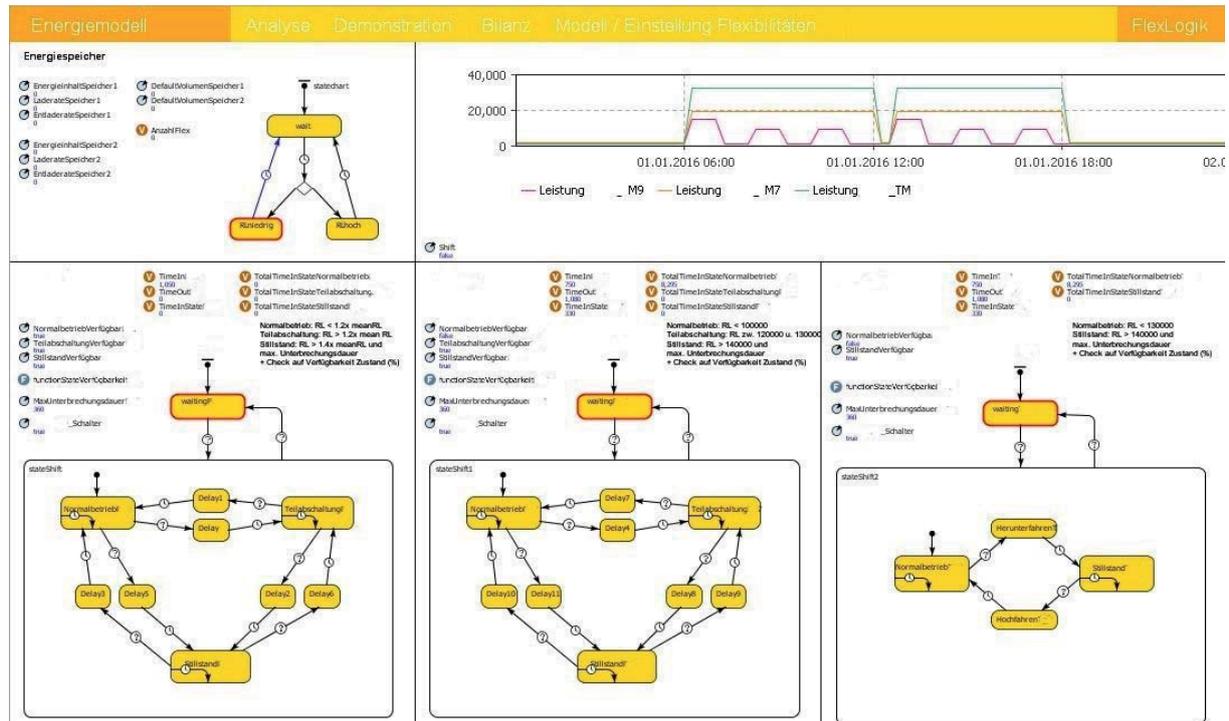


Abbildung 4-1: Modellierung verschiedener Flexibilitätsmaßnahmen

Die optimierten Flexibilitätseinsätze sind simultan zu Erzeugung, Verbrauch und Residuallast in einem separaten Fenster visualisiert. Der dargestellte Zeitraum kann dabei zwischen Tag, Woche, Monat und Jahr variiert werden. Je nach Stakeholder wird eine technisch orientierte Darstellung (Abbildung 4-2) oder eine für den Stakeholderdialog geeignete Demonstrationsansicht mit relevanten Kenngrößen verwendet.

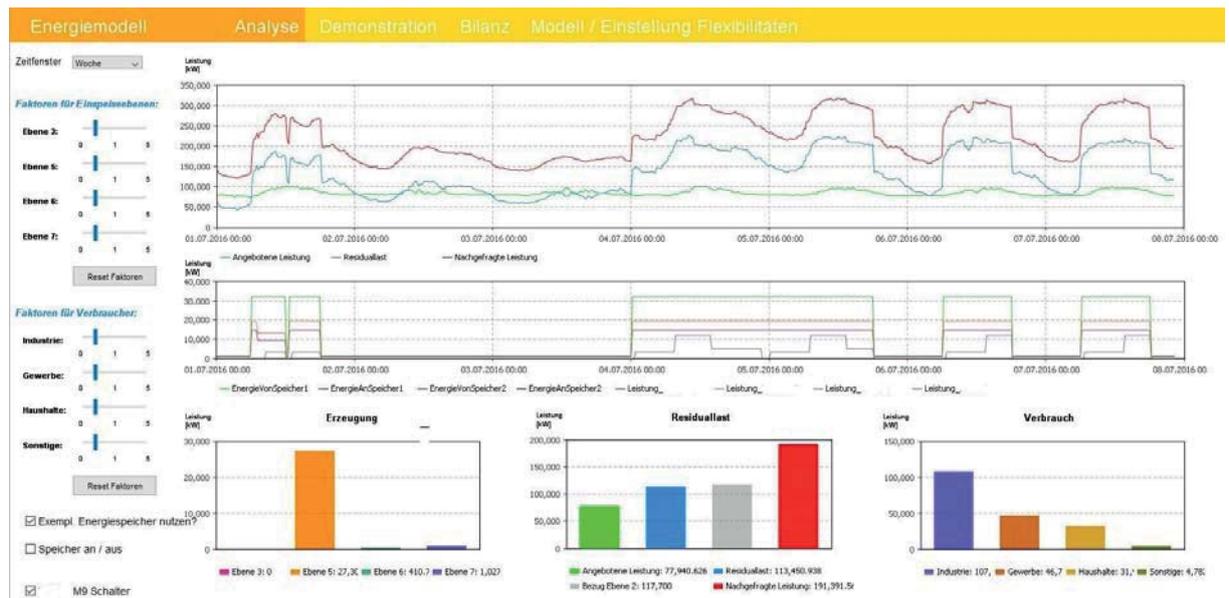


Abbildung 4-2 Technisch orientiertes Visualisierungsfenster mit Darstellung der Flexibilitätseinsätze und Skalierungsfaktoren

Links im Visualisierungsfenster befinden sich Skalierungsfaktoren, welche eine Modifikation der in Abbildung 3-2 dargestellten Kategorien für Erzeugung und Verbrauch ermöglichen. So können abweichende Zielsetzungen, Entwicklungsszenarien und Ausbaukorridore berücksichtigt werden. Als Lastgänge sind im oberen Bereich Erzeugung (grün), Verbrauch (rot) und Residuallast (blau) mit Einfluss der eingesetzten Flexibilitäten dargestellt sowie mittig die hinterlegten Flexibilitäten mit ihren Einsatzzeiträumen.

Ein weiteres Fenster gibt einen bilanziellen Überblick über energetische und monetäre Faktoren. Es ist vorgesehen, darüber hinaus verschiedene technische, sozio- sowie ökologische Anwendungsfälle zu definieren und deren Auswirkungen auf andere Sphären zu evaluieren. Aufgrund der Modularität des Energiemodells ist die Erweiterung um zusätzliche Fenster und Parameter zur Visualisierung sozio- und ökologischer Fragestellungen des Stakeholderdialogs realisierbar.

Abbildung 4-3 zeigt einen konkreten Anwendungsfall für den Einsatz der Flexibilitätsmaßnahmen zweier Maschinen eines betrachteten Unternehmens. Da diese Prozesse in der Regel rund um die Uhr betrieben werden, liegen die Flexibilitätspotentiale im Teillastbetrieb oder Stillstand der Maschinen. Die Veränderung der Fahrgeschwindigkeit der Maschinen im Teillastbetrieb ermöglicht so eine erhebliche Reduzierung des Energieverbrauchs. [7] Zur Änderung des Produkttyps oder für Wartungen ist ein Herunterfahren der Anlagen notwendig. Aufgrund der erheblichen Leistungsaufnahme der Maschinen sind die Auswirkungen der Flexibilitätseinsätze auf Verbrauch und Residuallast der Modellregion (roter bzw. blauer Lastgang) im Vergleich zu den Lastgängen ohne Flexibilitätseinsätze (graue Lastgänge) erkennbar. Die Teillastphasen und notwendigen Abschaltungen wurden zur Spitzenglättung in verbrauchstarke Zeitfenster verschoben.

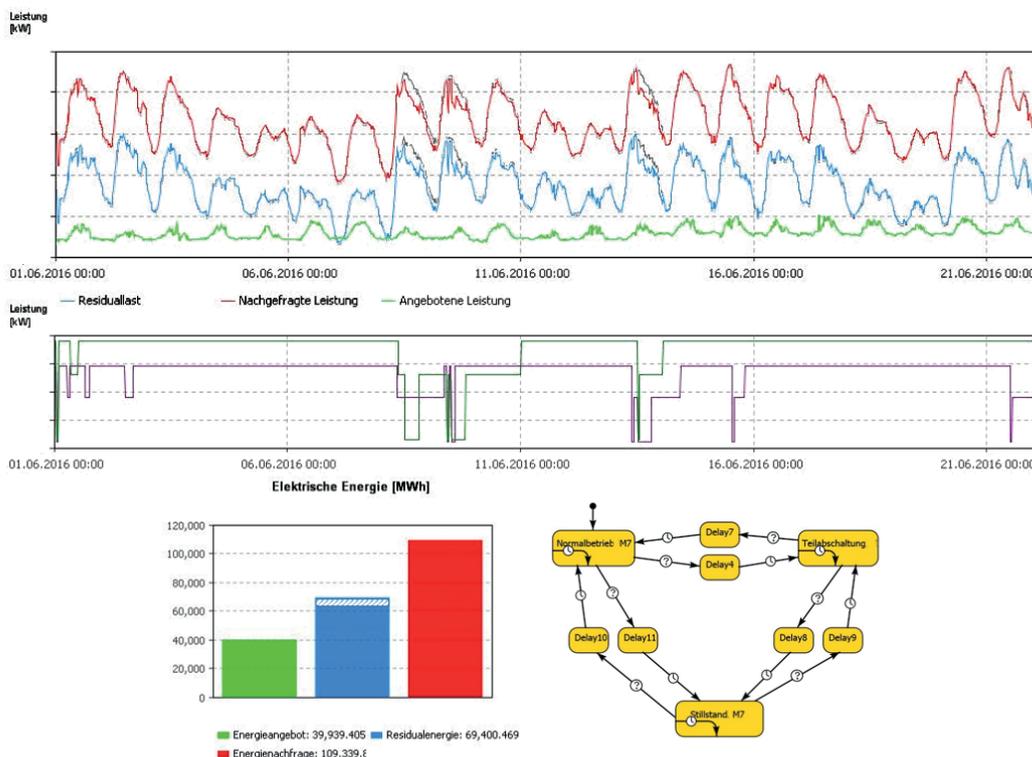


Abbildung 4-3: Exemplarische Flexibilitätseinsätze und deren Auswirkungen auf Residuallast und Verbrauch (oben) mit Energiebilanz und Zustandsdiagramm (unten)

Eine Energiebilanz visualisiert darüber hinaus die Diskrepanzen zwischen Erzeugung und Verbrauch für den Einsatz der Flexibilitäten. Simultan zur Darstellung des Zeitraumes erfolgt in Zustandsdiagrammen die Veranschaulichung der Anlagenzustände der Maschinen, welche zwischen Normalbetrieb, Teilabschaltung und Stillstand variieren. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Leistungsaufnahmen der Flexibilitäten ist somit ein erleichtertes Verständnis der aktuellen Betriebszustände gegeben.

5 Fazit und Ausblick

Die beschriebene Simulationsumgebung stellt ein umfassendes und anwenderfreundliches Werkzeug für die Analyse und Visualisierung von industriellen Flexibilitäten dar. Die Eingabe von Flexibilitätsmaßnahmen erfolgt anhand wesentlicher Charakteristika. Darauf aufbauend modelliert die Simulationsumgebung Bausteine für einen Algorithmus, welcher diese ausgehend von der gewählten Zielgröße zur Verbesserung der Versorgungssituation einsetzt. So kann der Anwender ohne ausgeprägte Modellierkenntnisse selbständig in definierten Szenarien das technische Potenzial des Flexibilitätseinsatzes untersuchen. Als Ausgangsbasis für mögliche Anwendungen kann beispielsweise das BDEW-Ampelkonzept dienen, für das entsprechende Versorgungszustände abgebildet werden können, um festzustellen, ob die verfügbaren Flexibilitäten zur Beseitigung von Netzengpässen in einer Modellregion ausreichen. [8] Weiterhin kann in den folgenden Untersuchungen ermittelt werden, ob sich eine Region durch Flexibilisierung der Lastseite nach dem zellularen Ansatz austarieren lässt, wenn die flexiblen Verbraucher an die volatile Erzeugungsleistung angepasst werden. [9] Die vielfältigen Zusammenhänge und Auswirkungen des Flexibilitätseinsatzes lassen sich anschließend in interdisziplinären Teams erörtern, wobei die Simulationsergebnisse als Diskussionsbasis dienen und so den fachlichen Dialog zwischen den Stakeholdern unterstützen. Werden bei dem simulationsgestützten Einsatz der Flexibilitäten geeignete soziologische und ökologische Kenngrößen hinterlegt, ist das Flexibilisierungspotenzial quantifizierbar und so durch die beteiligten Stakeholder strukturiert bewertbar. Die Ansätze können daraufhin übergreifend in vergleichbare Modellregionen übertragen werden und weiteren Lösungsansätzen der Energiewende, wie Speichertechnologien, Spartenkopplung oder konventionellem Netzausbau gegenübergestellt werden.

Die Autoren bedanken sich herzlich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung und beim Projektträger Jülich (PtJ) für die Betreuung des Kopernikus-Projektes „SynErgie“.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesregierung, „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung,“ 2010.
- [2] Deutsche Energie-Agentur (dena), „Roadmap Demand Side Management. Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem.,“ 2016.
- [3] „Energieatlas Bayern,“ [Online]. Available: <https://www.energieatlas.bayern.de/>. [Zugriff am 22 01 2018].
- [4] Unterberger, E. et al., „The regional and social impact of energy flexible factories,“ 2017.
- [5] Deutsche Energie-Agentur (dena), Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien., 2014.
- [6] Grassl, M., Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion, München: Technische Universität München, 2015.
- [7] Bertsch, J. et al., „Ausgangsbedingungen für die Vermarktung von Nachfrageflexibilität - Status-Quo-Analyse und Metastudie,“ 2017.
- [8] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Diskussionspapier: Konkretisierung des Ampelkonzepts im Verteilungsnetz,“ 2017.
- [9] Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik VDE, Der Zellulare Ansatz: Grundlage einer erfolgreichen, regioneneübergreifenden Energiewende, Frankfurt, 2015.